Bernd Heißing/
Metin Ersoy (Hrsg.)

Fahrwerkhandbuch

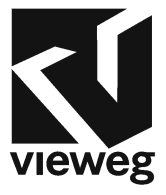
Bernd Heißing/
Metin Ersoy (Hrsg.)

Fahrwerkhandbuch

Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven

Mit 973 Abbildungen

ATZ/MTZ-Fachbuch



Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das Fahrwerkhandbuch entstand mit freundlicher Unterstützung der ZF Friedrichshafen AG.
Zuschriften und Verbesserungsvorschläge werden erbeten unter „Fahrwerkhandbuch@zf.com“.

1. Auflage Mai 2007

Lektorat: Ewald Schmitt / Gabriele McLemore

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen der Springer Science+Business Media.
www.vieweg.de



Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de
Satz und Technische Redaktion: Klementz publishing services, Gundelfingen
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0105-0

Vorwort

Die Fahrwerktechnik nimmt in der Ausbildung des Fahrzeugingenieurs eine zentrale Stelle ein. Obwohl die Fahrwerktechnik sich in den letzten 20 Jahren rasant entwickelte, insbesondere durch den stetigen Einfluss der Elektronik, fehlte es bislang an einem Handbuch, das gleichermaßen die Grundlagen der Konstruktion und Fahrdynamik sowie die Komponenten, Systeme, Mechatronik und die künftigen Entwicklungen aufzeigt.

Auf Anregung des Vieweg Verlags wurde die renommierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch um ein Handbuch zum Thema Fahrwerktechnik ergänzt. Die besonderen Belange von Automobilherstellern, Zulieferern und Hochschule mussten, ohne zu sehr ins Detail zu gehen, in diesem Handbuch Berücksichtigung finden. Dabei wurden auf die Aktualität und leichte Lesbarkeit besonders Wert gelegt und alle Themen mit zahlreichen Bildern und Tabellen systematisch, verständlich und übersichtlich dargestellt.

Der Detaillierungsgrad ist so gehalten, dass den Fahrwerkentwicklern ein kompletter Überblick über das Arbeitsgebiet, den Applikationsingenieuren der Einblick in die Fahrdynamik moderner Automobile und den Studenten eine vollständige Wissensbasis für den späteren Beruf an die Hand gegeben wird.

In einem ersten Teil werden Konzepte, Aufbau und Auslegung, die physikalischen Grundlagen der Längs-, Vertikal- und Querdynamik erklärt und die Fahrwerkkenngrößen mit deren Bedeutung für die Fahreigenschaften beschrieben. Es schließen sich sehr ausführlich die Bestandteile des Fahrwerks wie Bremsen, Lenkung, Federung, Dämpfung, Radführung, Radlagerung bis zu den Reifen und Rädern an. Danach folgen die Beschreibung und die Gegenüberstellung der Achsen und Radaufhängungen. Ein eigener Abschnitt wird dem Fahrkomfort (NVH) mit den Gummiverbundteilen gewidmet. Die modernen Entwicklungsmethoden und -werkzeuge des Entwicklungsingenieurs, welche die Planungs- und Serieneinführungsphase, das Simulieren und Entwerfen bis zum Validieren der Komponenten, Module und Systeme des Fahrwerks umfassen, werden dargestellt. Die Systeme, welche die aktuellen Sicherheits- und Komfortansprüche im Fahrwerk erfüllen und dem Fahrer assistieren, werden im vorletzten Kapitel vorgestellt; es umfasst alle elektronischen und mechatronischen Fahrwerksysteme, die aktiv, semiaktiv, adaptiv oder durch X-by-wire funktionieren. Das letzte Kapitel geht weit in die Zukunft und untersucht die Konzepte und Systeme für das Fahrwerk von morgen sowie Fahrwerke für Hybridfahrzeuge. Vorausschauende und intelligente Fahrwerke und das autonome Fahren sowie die Visionen der „driving chassis“ und „e-corner“ werden diskutiert. In den drei Zukunftsszenarien wird versucht herauszufinden, wie das Fahrwerk in 2025 aussehen könnte.

In diesem Handbuch haben fast 40 namhafte Fachexperten von Automobilherstellern, deren Zulieferern und Universitäten ihr aktuelles Wissen zu Papier gebracht. Neben den namentlich erwähnten Autoren, haben viele weitere Fachleute, sei es durch fachliche Diskussion oder Beratung, zum Gelingen des Handbuchs tatkräftig beigetragen; Kurzbeiträge, Empfehlungen, Korrekturen und die Bereitschaft zum fachlichen Gegenlesen haben dabei geholfen. Nicht unerwähnt bleiben sollte die unermüdliche Unterstützung unserer Office-Mannschaft in den Hochschulen (RWTH Aachen und TU München), der Industrie (Audi, Continental, Mubea, Schaeffler KG, FAG, TÜV-Süd, ZF Friedrichshafen) und im Vieweg Verlag bei allen organisatorischen Aufgaben. Allen sagen wir an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

Die Leser dieses Buches bitten wir, uns ihre Anregungen, Verbesserungs- bzw. Ergänzungsvorschläge unter der Email-Adresse fahrwerkhandbuch@zf.com mitzuteilen, damit wir diese bei der weiteren Entwicklung des Fahrwerkhandbuchs berücksichtigen können.

München, 16. März 2007
Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Lemförde, 15. März 2007
Prof. Dr. Ing. Metin Ersoy

Autorenverzeichnis

Albers, Ingo, Dipl.-Ing.
2.3, 2.4, 2.5
IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen
www.ika.rwth-aachen.de

Binner, Peter, Dipl.-Ing.
5.3
ZF Boge Elastmetall GmbH, Bonn
www.zf.com

Brändle, Markus, Dipl.-Ing.
7.8
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de

Burgstaler, Andree, Dipl.-Ing.
3.3.6.8
ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme
www.zf.com

Carlitz, Andreas, Dr.-Ing.
3.5.1 bis 3.5.4
Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorn
www.mubea.com

Causemann, Peter, Dr.-Ing.
3.5.6 bis 3.5.8, 3.6
früher ZF Sachs AG, Schweinfurt

Demmerer, Stephan, Dr. rer.nat.
8.8
ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen
www.zf.com

Elbers, Christoph, Dr.-Ing.
2, 2.1 bis 2.7, 7.6, 7.7
ZF Lemförder GmbH, Lemförde
www.zf.com

Ersoy, Metin, Prof. Dr.-Ing.
1, 3.1, 3.2, 3.4.3, 3.7, 4, 6, 7.6.3.6, 8.1.3, 8.4, 8.5, 8.7, 8.9
ZF LemförderGmbH, Lemförde
www.zf.com

Gies, Stefan, Prof. Dr.-Ing.
4.1 bis 4.5
IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen
www.ika.rwth-aachen.de
(früher Audi AG, Ingolstadt)

Gruber, Steffen, Dipl.-Ing.
3.3
Continental Teves AG & Co., oHG, Frankfurt a. M.
www.contiteves.com

Heißing, Bernd, Univ.-Prof. Dr.-Ing.
2.8, 2.9, 4, 7.8, 8.1 bis 8.5, 8.9
FTM Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de

Hoffmann, Carsten, Dipl.-Ing.
2.6, 2.7, 7.6, 7.7
IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen
www.ika.rwth-aachen.de

Hüsemann, Thomas, Dipl.-Ing.
2.1, 2.2, 2.6
IKA Institut für Kraftfahrwesen, Aachen
www.ika.rwth-aachen.de

Kramer, Klaus, Dipl.-Ing.
5.4 bis 5.9
ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme
www.zf.com

Krimmel, Horst, Dr. rer. nat.
7.1 bis 7.5
ZF Friedrichshafen AG/ZF-TE, Friedrichshafen
www.zf.com

Mayer, Ralph, Dipl.-Ing.
7.8
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de

Meitinger, Karl-Heinz, Dipl.-Ing.
7.8
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de

Mundl, Reinhard, Dr.-Ing.
3.9
Continental AG, Wien
www.conti.de

Neubrand, Jörg, Dr.-Ing.
3.5.1 bis 3.5.4
Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorn
www.mubea.com

Ocvirk, Norbert, Dipl.-Ing.
3.3
Continental Teves AG & Co., OHG, Frankfurt a. M.
www.contiteves.com

Plank, Robert, Dr.-Ing.
3.8
Schaeffler KG, Schweinfurt
www.fag.com

Remfrey, James, Dipl.-Ing.
3.3
Continental Teves AG & Co., oHG, Frankfurt a. M.
www.contiteves.com

Rieger, Wolfgang, Dipl.-Ing.
3.4
früher ZF Lenksyteme GmbH, Donzdorf
www.zf-lenksysteme.com

Rosemeier, Thomas, Dr.-Ing.
3.2
ZF Friedrichshafen AG/ZF-TI-F, Friedrichshafen
www.zf.com

Sauer, Wolfgang, Dr.-Ing.
5.1, 5.2
ZF Boge Elastmetall GmbH, Bonn
www.zf.com

Schäfer, Burkhardt, Dipl.-Ing.
3.4.4
ZF-LS Bremen, Nacam Deutschland GmbH, Bremen
www.ZF-Lenksysteme.com

Schick, Bernhard, Dipl.-Ing.
3.9.5.4, 3.9.6, 3.9.7
TÜV SÜD Automotive GmbH, Garching
www.tuev-sued.de/automotive

Schlereth, Werner, Dipl.-Ing.
3.8
Schaeffler KG, Schweinfurt
www.fag.com

Schröder, Carsten, Dipl.-Ing.
3.9
Continental AG, Hannover
www.conti.de

Siebendritt, Harry, Dipl.-Ing.
8.1, 8.2
Technische Universität München
www.ftm.mw.tum.de

Siemer, Hubert, Dipl.-Ing.
5.10 bis 5.12
ZF Boge Elastmetall GmbH, Damme
www.zf.com

Stingl, Hanno, Dipl.-Ing.
6.1 bis 6.4, 6.7, 6.8
Audi AG, Ingolstadt
www.audi.com

Volk, Heiner, Dipl.-Ing.
3.9
Continental AG, Wien
www.conti.de

Vortmeyer, Jens, Dipl.-Ing.
3.5.5
ZF Lemförder GmbH, Lemförde
www.zf.com

Wies, Burkhard, Dr.-Ing.
3.9
Continental AG, Hannover
www.conti.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

AAS	Adaptive Air Suspension
ABC	Active Body Control
ABS	Anti-Blockiersystem
ABV	Anti-Blockiervorrichtung
ACC	Autonomous / Adaptive Cruise Control
ACE	Active Cornering Enhancement
ADR	Automatische Distanzregelung
ADS	Adaptives Dämpfungssystem
AFS	Active Front Steering
AFS	Aktive Fahrwerkstabilisierung
AGCS	Active Geometry Control Suspension
AHK	Aktive Hinterachskinematik
AICC	Autonomous Intelligent Cruise Control
AKC	Active Kinematic Control
ALC	Automatic Linear Guidance Control
AMR	Antriebsmoment Regelung
ANB	Automatische Notbremsung
AOS	Adaptive Off-Road Stabilizer
APB	Aktive Parkbremse – Active Parking Brake
APS	Automatic Parking System
APQP	Advanced Product Quality Planning
ARM	Active Roll Mitigation
ARP	Active Rollover Control
ARS	Active Roll Stability
ART	Abstandsregeltempomat
ASC	Automatic Stability Control
ASCA	Active Suspension via Control Arm
ASCS	Active Suspension Control System
ASCx	Automatic Stability Control x (Allwheel)
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASL	Anhänger-Schlingern-Logik
ASMS	Autom. Stabilitätsmanagementsystem
ASR	Antriebsschlupfregelung
ASTC	Advanced Stability Control
ATC	Active Tilt Control
ATTC	Active Tire Tilt Control
AUN	Allgemeiner Unebenheitsindex
AWD	All Wheel Drive
AWS	All Wheel Steering
AYC	Active Yaw Control
BAB	Bundesautobahn
BAS	Bremsassistenz
BASR	Bremsen-Antriebs-Schlupf-Regelung
BBC	Brake Boost Control
BbW	Brake by Wire
Bj.	Baujahr
BKV	Bremskraftverstärker
BMR	Bremsmomentenregelung
BBA	Betriebsbremsanlage
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAN	Controller Area Network
CASE	Computer Aided Software Engineering
CATS	Computer Active Technology Suspension
CBC	Cornering Brake Control
CBS	Combined Brake System
CDC	Continuous Damper Control
CDL	Collision Danger Level
DBC	Dynamic Brake Control
DBS	Dynamic Brake Support
DC	DaimlerChrysler
DD	Dynamic Drive
DDE	Digitale Dieselelektronik
DDS	Deflation Detection System
DIN	Deutsches Institut für Normung
DME	Digitale Motorelektronik
DMU	Digital Mock Up
DOE	Design of Experiment
DQL	Doppelquerlenker
DRC	Dynamic Ride Control
DSC	Dynamic Stability Control
DSP	Dynamisches Stabilitätsprogramm
DSCT	Dynamic Stability and Traction Control
DTC	Dynamic Traction Control
DXC	Dynamic x(Allrad) Control
eABC	Electromechanical Active Body Control
EAS	Electronic Active Steering Assistant
EBA	Elektronischer Bremsassistent
EBC	Electronic Body Control
EBD	Electronic Brake Distribution
EBM	Elektronisches Bremsen-Management
EBS	Electronically Controlled Braking System
EBV	Elektronische Bremskraftverteilung
ECD	Electronic Controlled Deceleration
ECE	Economic Commission for Europe
ECM	Electronic Chassis Management
ECU	Electronic Control Unit
EDC	Elektronic Damper Control
EDS	Elektronische Differenzialsperre
E/E	Elektrik/Elektronik
EHB	Elektrohydraulische Bremse
EGS	Elektronische Getriebesteuerung
EMB	Elektromechanische Bremse
EMC	Electro Magnetic Compatibility
EMF	Elektromechanische Feststellbremse
EMP	Elektronische Parkbremse
EPS	Electric Power Steering
ESD	Electrostatic Discharge
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETC	Elektronische Traktionskontrolle

FAS	Fahrerassistenz-Systeme
FDR	Fahrdynamikregelung
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transformation
FGR	Fahrgeschwindigkeitsregler
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FPDS	Ford Product Development System
FPM	Fahrpedal-Modul
FSR	Fahrstabilitätsregelung
GCC	Global Chassis Control
GMR	Giermomentenregelung
GM	General Motors
HA	Hinterachse
HAQ	Hinterachs-Quersperre
HBA	Hydraulischer Bremsassistent
HBM	Hydraulisches Bremsenmanagement
HCU	Hydraulic Control Unit
HDC	Hill Descent Control
HECU	Hydraulic Electronic Control Unit
HiL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interface
HPS	Hydraulic Power Servosteering
ICC	Intelligent Cruise Control
ICC	Integrated Chassis Control
ICCS	Integrated Chassis Control System
ICD	Intelligent Controlled Damper
ICM	Integrated Chassis Management
IDS	Interaktives Dynamisches Fahrsystem
IR	Individual(Einzelrad)-Regelung
ISAD	Integrated Starter Alternator Damper
ISG	Integrated Starter Generator
ISO	International Standards Organization
IWD	Intelligent Wheel Dynamics
K&C	Kinematics and Compliances
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LbW	Leveling by Wire
LCC	Lane Change Control
LIN	Local Interconnected Network
LWS	Lenkwinkelsensor
MB	Mercedes Benz
MBA	Mechanischer Bremsassistent
MBS	Multi Body System / Simulation (MKS)
MBU	Motorbremsmomentunterstützung
MKS	Multikörpersimulationssystem
MMI	Man Machine Interface
MPV	Multi Purpose Vehicle
MSR	Motor Schleppmomentenregelung
NVH	Noise Vibration Harshness
OCP	Optimized Contact Patch
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCB	Printed Circuit Board
PDC	Park Distance Control
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PM	Projektmanagement
PSD	Power Spectral Density
PTO	Power Take Off
RDK	Reifendruckkontrolle
RIM	Radindividuelle Momentenregelung
RLDC	Road Load Data Collections
ROP	Roll Over Protection
RSP	Roll Stability Control
SBC	Sensotronic Brake Control
SbW	Steer by Wire
SE	Simultaneous Engineering
SiL	Software in the Loop
SIL	Safety Integrity Level
SLS	Self Leveling Suspension
SMR	Schleppmomentenregelung
SOP	Start of Production
SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
SSP	Strassensimulationsprüfstand
STC	Stability Traction Control
SUC	Sport Utility Cabriolet
SUV	Sport Utility Vehicle
SW	Software
S&G	Stop and Go
TC(S)	Traction Control (System)
THZ	Tandemhauptbremszylinder
TMC	Tandem Main Cylinder
TPMS	Tire Pressure Monitoring System
TTP	Time Triggered Protocol
UCL	Under Steer Control Logic
ÜLL	Überlagerungslenkung
VA	Vorderachse
VDC	Vehicle Dynamic Control
VGRS	Variable Gear Ration Steering
VPE	Virtual Product Environment
VSA	Vehicle Stability Assist
VSC	Vehicle Stability Control
VTD	Variable Torque Distribution
VTG	Verteilergetriebe
xDRIVE	Allrad System
WSS	Wheel Speed Sensor
µC/µP	Microcomputer / Microprocessor
4Motion	Permanenter Allradantrieb
4WS	Four Wheel Steering